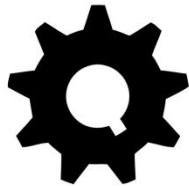




UNIVERSIDADE  
FEDERAL DE GOIÁS

Instituto de Química

IQ - UFG



ENGENHARIA QUÍMICA

Universidade Federal de Goiás

# Introdução à Transferência de Calor

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Universidade Federal de Goiás

Curso: Graduação em Engenharia Química

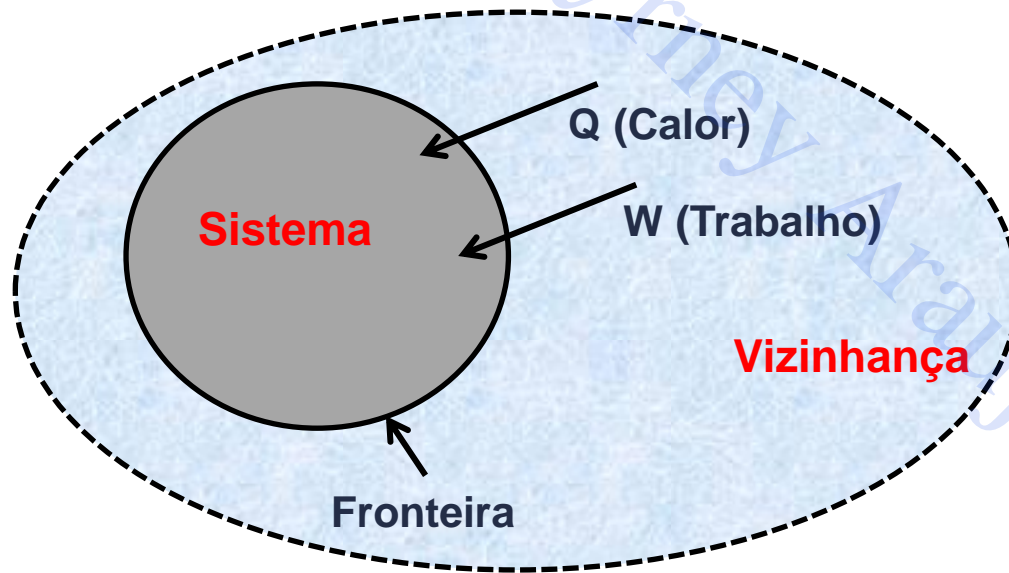
Disciplina: Fenômenos de Transporte 2

site: [www.dyrney.com](http://www.dyrney.com)

# 1. Origem Física e Equações de Taxas

## 1.1 Termodinâmica versus Transferência de Calor

**Da Termodinâmica tem-se:** A energia pode ser transferida através de interações de um sistema com a sua vizinhança. Essas interações se dão por meio da troca de trabalho ( $W$ ) e calor ( $Q$ ).



A termodinâmica lida com os **estados extremos de equilíbrio** (inicial e final) do processo ao longo do qual uma interação ocorre, e não fornece informação sobre a natureza da interação ou sobre a taxa na qual ela ocorre.

**Objetivos do estudo de Transferência de Calor em Fenômenos de Transporte:** Estender a análise termodinâmica através do estudo dos modos ou mecanismos de transferência de calor e desenvolver relações para calcular as taxas ou fluxos de transferência de calor

**OBS.:** Diferentemente da Termodinâmica, a **Transferência de Calor** trabalha com sistemas que não estão em equilíbrio térmico, pois são fenômenos de não equilíbrio termodinâmico.

# 1. Origem Física e Equações de Taxas

## 1.2 Conceito de Calor e Modos de Transferência de Calor

O que é Transferência de Calor?

É a energia em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço. Sempre que existir uma **diferença de temperaturas** (ou **gradiente de temperaturas**) em um meio ou entre meios, haverá, necessariamente, transferência de calor.

### Modos ou Mecanismos de Transferência de calor



Fonte da Imagem: <http://lugezi.com/images/>

**Condução:** Transferência de calor através de um sólido ou de um fluido (líquido ou gás) estacionário em virtude da presença de um gradiente de temperaturas no meio. Processo essencialmente difusivo.

**Convecção:** Transferência de calor entre uma superfície e um fluido em movimento (líquido ou gás), estando os dois a diferentes temperaturas. Processo causado por diferença de temperaturas ou densidades entre diferentes partes do fluido.

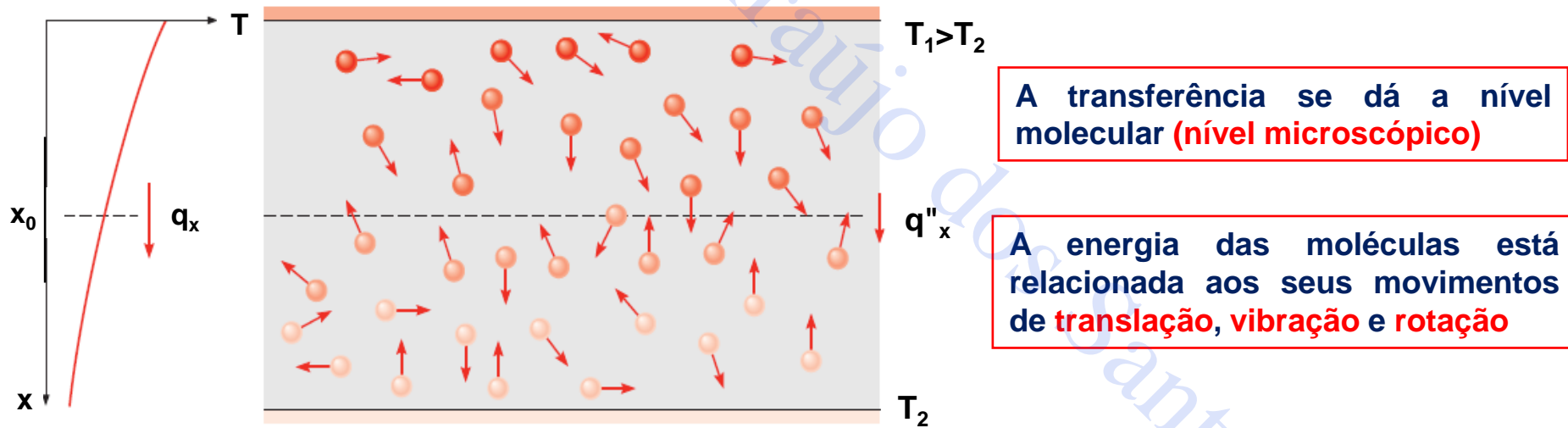
**Radiação Térmica:** Transferência de calor entre duas superfícies com temperaturas acima de zero kelvin (0 K), mesmo na ausência de um meio interposto participante.

# 1. Origem Física e Equações de Taxas

## 1.3 Breve discussão sobre a Condução Térmica

**Condução:** transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas devido às interações entre elas. Em líquidos e gases, a condução deve-se às colisões e difusões das moléculas em seus movimentos aleatórios. Nos sólidos, ela acontece por causa da combinação das vibrações das moléculas em rede, e a energia é transportada por elétrons livres

**Exemplo:** Considere um gás confinado entre duas placas “infinitas” no qual exista um gradiente de temperatura. Neste caso, visto que  $T_1 > T_2$ , não se observa movimento global ou macroscópico do fluido. Logo, a transferência se dá por condução pura, mesmo sendo no interior de um fluido.



Fonte (modificado): Incropera e Dewitt (2008)

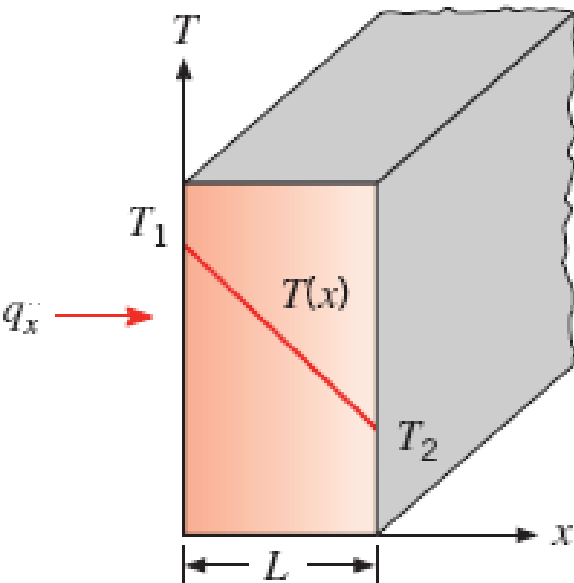
**OBS.:** O fluxo de calor é sempre contrário ao gradiente de temperatura, ou seja, ocorre no sentido da diminuição da temperatura

# 1. Origem Física e Equações de Taxas

## 1.3 Breve discussão sobre a Condução Térmica

**Lei de Fourier:** representa a equação do fluxo de calor por condução, sendo este proporcional e contrário ao gradiente de temperaturas

$$\vec{q} = -k\nabla T$$



**OBS.:** A Lei de Fourier é representada por uma equação vetorial e diferencial, sendo que o sinal negativo indica que o fluxo de calor é sempre contrário ao gradiente de temperatura.

**Exemplo:** Para o caso unidimensional (**gradiente apenas na direção x**) representado na figura ao lado, o fluxo térmico condutivo em coordenadas cartesianas se torna:

$$q_x = -k \frac{dT}{dx}$$



Jean-Baptiste Joseph Fourier  
(1768-1830)

(Matemático e físico francês)

- **O fluxo térmico  $q$  ( $W/m^2$ ):** é a taxa de transferência de calor,  $Q$  ( $W$ ), por unidade de área perpendicular à direção da transferência e é proporcional ao gradiente de temperatura ( $\nabla T$ )
- **Parâmetro  $k$  ( $W/(m.K)$ ):** é uma propriedade de transporte conhecida como condutividade térmica e é característica do material ou do meio onde se dá a transferência por condução.

# 1. Origem Física e Equações de Taxas

## 1.3 Breve discussão sobre a Condução Térmica

**Condutividade térmica:** PROPRIEDADE TERMODINÂMICA

- **Efeito da Temperatura:** FORTE
- **Efeito da Pressão:** MODERADO, considera-se desprezível para  $P \leq 100$  atm

Comportamento da condutividade térmica com a temperatura para gases e líquidos

Condutividade dos gases aumenta com a temperatura.



$$\frac{k}{k_0} \approx \begin{cases} \left(\frac{T}{T_0}\right)^n & \text{Lei de Potência} \\ \frac{(T/T_0)^{3/2} (T_0 + S)}{T + S} & \text{Lei de Sutherland} \end{cases}$$

Condutividade dos líquidos e sólidos diminui com a temperatura.



$$\ln\left(\frac{k}{k_0}\right) \approx a + b\left(\frac{T_0}{T}\right) + c\left(\frac{T_0}{T}\right)^2$$

**OBS.: 1)**  $k_0$  é uma condutividade conhecida a uma temperatura absoluta  $T_0$  (273K)

**2)** As constantes  $n$ ,  $S$ ,  $a$ ,  $b$  e  $c$  são ajustadas aos dados empíricos (depende do material)

# 1. Origem Física e Equações de Taxas

## 1.3 Breve discussão sobre a Condução Térmica

Condutividade térmica de alguns materiais/meios em temperatura ambiente

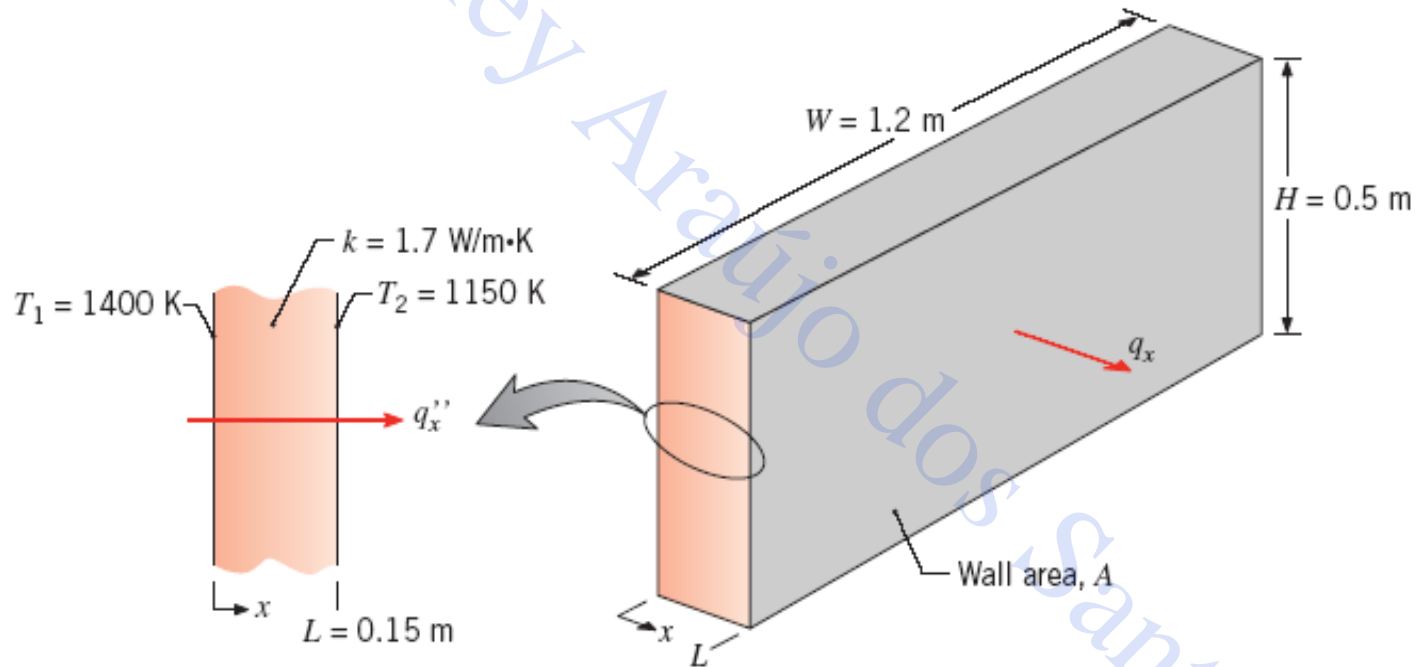
Material	k (W/m°C)
Diamante	2300
Prata	410
Cobre	385
Ouro	317
Alumínio	202
Chumbo	35
Arenito	1,83
Vidro	0,78
Fibra de vidro	0,043
Água	0,556
Amônia	0,540
Hidrogênio	0,175
Hélio	0,141
Ar	0,024
Dióxido de Carbono	0,0146

Fonte: Incropera e Dewitt (2008)

e  
Çengel e Ghajar (2012)

# 1. Origem Física e Equações de Taxas

**Exercício Proposto 1:** A parede de um forno industrial é construída com tijolo refratário com **0,15 m** de espessura, cuja condutividade térmica é de **1,7 W/(m.K)**. Medidas efetuadas ao longo da operação revelam temperaturas de **1400 K** e **1150 K** nas paredes internas e externa, respectivamente. Considerando um perfil de distribuição linear de temperaturas no interior da parede ( $T = ax + b$ ), em estado estacionário, encontre a taxa de calor perdida através de uma parede que mede **0,5 m x 1,2 m**.

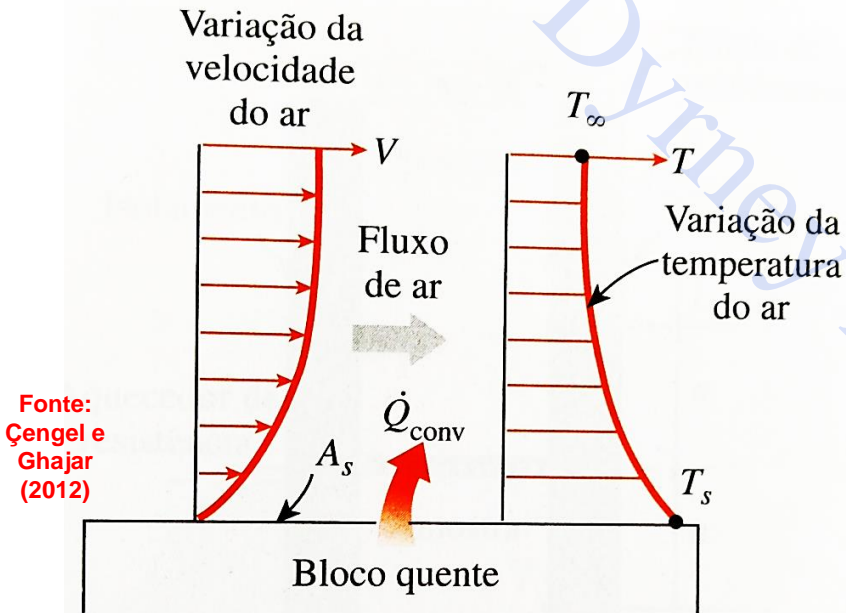




# 1. Origem Física e Equações de Taxas

## 1.4 Breve discussão sobre a Convecção Térmica

**Convecção:** a transferência de calor por convecção se dá pelo contato entre um fluido (líquido ou gás) em movimento e uma superfície, estando os dois a diferentes temperaturas.



De acordo com a figura ao lado, o calor é primeiro transferido para a camada de ar adjacente ao bloco por **condução**. Observe que a partícula de fluido adjacente à superfície sólida possui velocidade nula devido à condição de não deslizamento.

Esse calor é, então, transportado para longe da superfície por **convecção**.

Há, neste caso, como será discutido mais adiante neste curso, o surgimento de duas camadas limites, uma hidrodinâmica e uma térmica.

**OBS.:** A **convecção** pode ser vista como uma combinação complexa da **condução**, em que o calor que é conduzido de uma camada de fluido para outra, com a **advecção**, em que o calor é “arrastado” na direção do escoamento devido ao movimento do fluido.

**OBS.:** Diferentemente da **convecção**, que é um processo cuja força motriz é a diferença de temperaturas ou densidade, a **advecção** é independente de qualquer diferença de temperatura ou densidade, sendo exclusivamente devido ao movimento do fluido.

**Complexidade da Convecção:** o perfil de distribuição de temperaturas é dependente do perfil de distribuição de velocidades, ou seja, a **Equação da Energia** deve ser resolvida acoplada à **Equação de Transferência de Quantidade de Movimento Linear e de Conservação de Massa**.

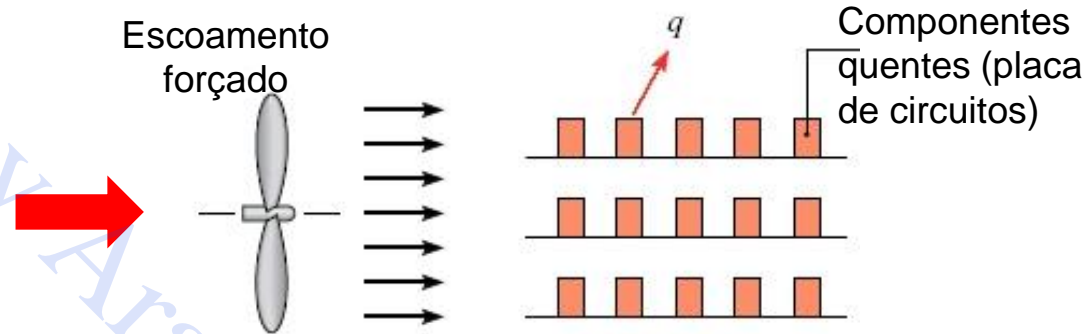
# 1. Origem Física e Equações de Taxas

## 1.4 Breve discussão sobre a Convecção Térmica

A transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido.

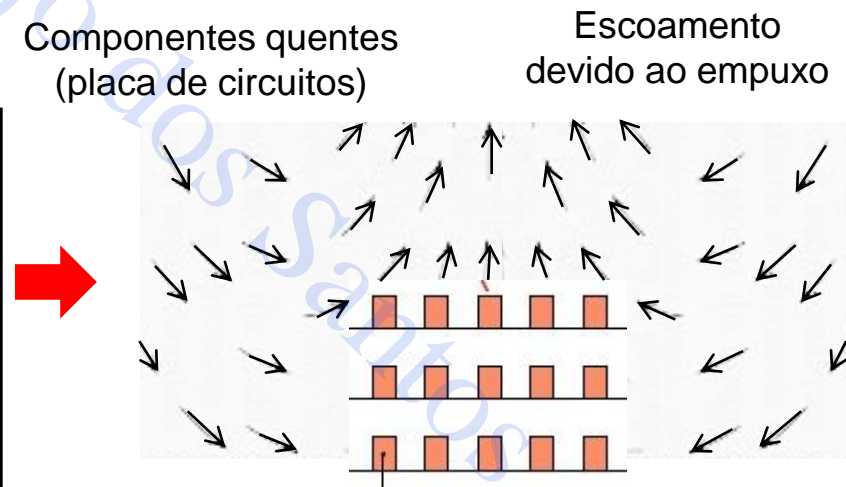
**Convecção Forçada:** Escoamento causado por meios externos.

**Ex.:** Uso de um ventilador para propiciar o resfriamento dos componentes eletrônicos quentes de placas de circuito



**Convecção Natural:** Escoamento induzido pelo desbalanceamento entre as forças peso e empuxo.

**Ex.:** Série de placas contendo componentes quentes. A densidade do ar que está em contato diminui devido ao aumento de temperatura e, desta forma, ascende (força de empuxo) e é substituído por ar à temperatura ambiente (força gravitacional).



Fonte: Incropera e Dewitt (2008)

# 1. Origem Física e Equações de Taxas

## 1.4 Breve discussão sobre a Convecção Térmica

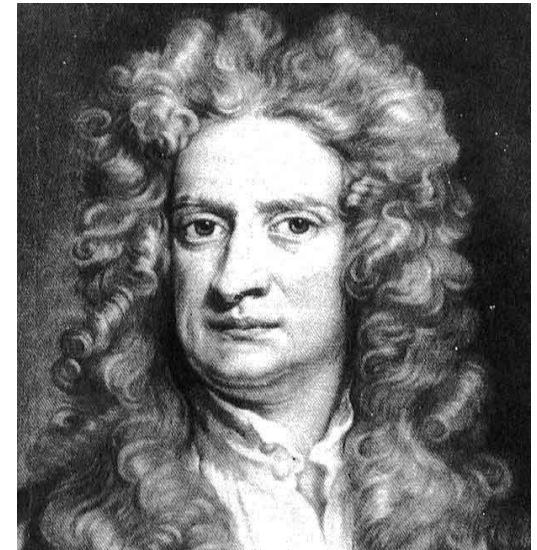
**Lei de Resfriamento de Newton:** independente da natureza do processo de transferência de calor por convecção (natural ou forçada), a equação apropriada para o fluxo de transferência de calor por convecção possui a forma:

$$q = h(T_s - T_\infty)$$

• **Fluxo de calor por convecção  $q$  ( $W/m^2$ ):** é proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície ( $T_s$ ) e do fluido suficientemente longe da superfície e dos efeitos térmicos ( $T_\infty$ );

• **Parâmetro  $h$  ( $W/(m^2.K)$ ):** é chamado de coeficiente de transferência de calor por convecção ou coeficiente de película (**visto que a transferência se dá na camada limite térmica**);

**OBS.:** apesar desta equação ser algébrica e, aparentemente, simples,  **$h$**  depende das condições na camada-limite, que por sua vez, são influenciadas pela geometria da superfície, pela natureza do escoamento (laminar ou turbulento) e por uma série de outras variáveis, o que torna bastante complexa a sua determinação.



Sir Isaac Newton  
(1642-1727)

(Físico, matemático e astrônomo inglês)

# 1. Origem Física e Equações de Taxas

## 1.4 Breve discussão sobre a Convecção Térmica

**OBS.:** Diferentemente da condutividade térmica ( $k$ ),  $h$  é uma propriedade do escoamento e não do fluido. Logo, o mesmo não pode ser tabelado como uma simples função da temperatura e da pressão. Na grande maioria das vezes,  $h$  é obtido por meio de correlações empíricas adimensionais, como será visto ao longo deste curso.

Faixas de valores típicos de  $h$  para diferentes situações

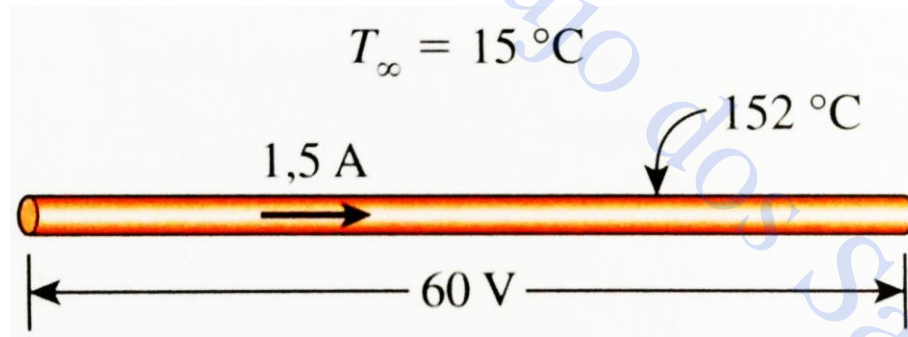
Processo	$h$ (W/m <sup>2</sup> °C)
<b>Convecção natural</b>	
Gases	2-25
Líquidos	50-1.000
<b>Convecção forçada</b>	
Gases	25-250
Líquidos	100-20.000
<b>Convecção com mudanças de fase</b>	
Ebulição ou condensação	2.500-100.000

# 1. Origem Física e Equações de Taxas

## Exercício Proposto 2:

### Determinação experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção

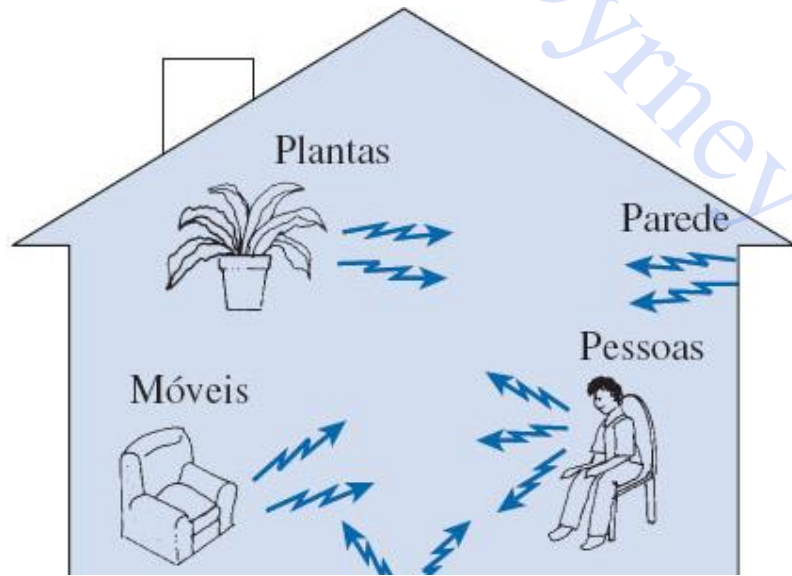
Um fio elétrico de **2 m** de comprimento e **0,3 m** de diâmetro se estende por uma sala a **15 °C**. Calor é gerado no fio como resultado do aquecimento da resistência. A medida da temperatura na superfície do fio é **152 °C**, em estado estacionário. Além disso, as medidas da queda de tensão e da corrente elétrica através do fio são de **60 V** e **1,5 A**, respectivamente. Considerando apenas a transferência de calor por convecção, determine o coeficiente de transferência de calor por convecção (**h**) para a transferência de calor entre a superfície externa do fio e o ar na sala.



# 1. Origem Física e Equações de Taxas

## 1.5 Breve discussão sobre a Radiação Térmica

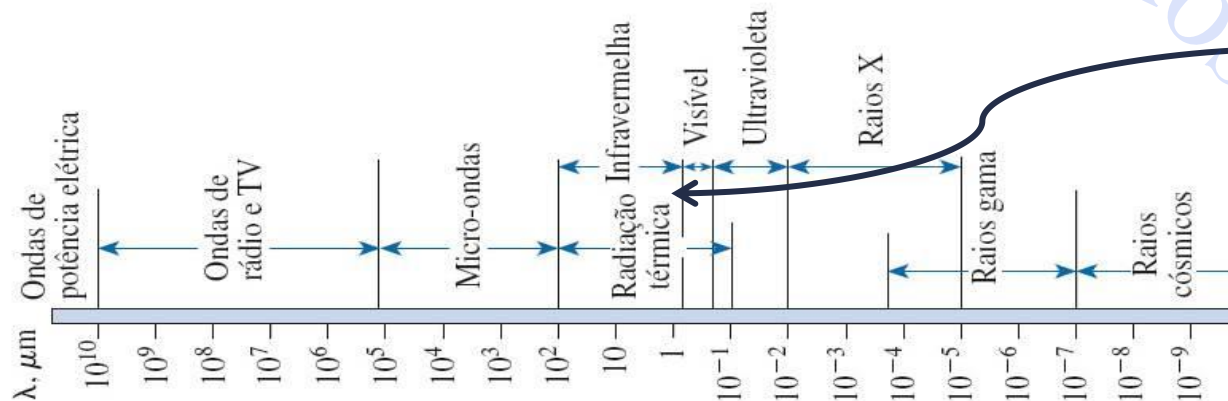
**Radiação térmica:** é a energia emitida por qualquer matéria que se encontra a uma temperatura diferente do zero absoluto ( $-273^{\circ}\text{C}$ ).



**OBS.:** A emissão de radiação pode se atribuída às mudanças nas configurações eletrônicas de átomos ou moléculas.

**OBS.:** A radiação é transportada por ondas eletromagnéticas e, diferentemente da transferência de energia por condução e convecção, a radiação térmica não necessita de um meio material para se propagar.

**OBS.:** A radiação térmica é apenas um dos tipos de radiação eletromagnética e se diferencia das demais por ter a sua origem exclusivamente devido à temperatura do corpo. A radiação térmica apresenta comprimento de onda entre **0,1 e 100  $\mu\text{m}$** .



# 1. Origem Física e Equações de Taxas

## 1.5 Breve discussão sobre a Radiação Térmica

**Lei de Stefan-Boltzmann:** representa a equação do fluxo de calor por radiação térmica para uma superfície ideal, conhecida como “corpo negro”

$$E_b = \sigma T_s^4$$

$E_b$ : poder emissivo ou taxa de energia emitida por uma superfície ideal por unidade de área ( $W/m^2$ )

$T_s$ : temperatura absoluta (K) da superfície;

$\sigma$ : constante de *Stefan-Boltzmann* ( $5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$ ).

**OBS.:** Para uma superfície real, o fluxo ( $E$ ) é sempre menor do que o ideal ( $E_b$ )

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

sendo  $0 \leq \varepsilon \leq 1$

**OBS.:**  $\varepsilon$  fornece uma medida da eficiência de emissão de uma superfície (propriedade do material).

**OBS.:** A taxa líquida de transferência de calor por radiação térmica entre duas superfícies ( $s_1$  e  $s_2$ , sendo  $s_1$  totalmente envolta por  $s_2$ ) é dada por:

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A_s (T_{s_1}^4 - T_{s_2}^4) \quad \text{sendo } A_s \text{ a área superficial}$$

**OBS.:** Por simplicidade e conveniência, pode-se, também, definir um coeficiente combinado  $h_{comb}$ , quando a radiação e a convecção forem significativas e ocorrerem simultaneamente

$$\dot{Q}_{Total} = h_{comb} A_s (T_{s_1} - T_{\infty}) \quad \text{sendo} \quad h_{comb} = h + \varepsilon \sigma (T_{s_1} + T_{s_2}) (T_{s_1}^2 + T_{s_2}^2)$$

**OBS.:** em geral a radiação é significativa em relação à condução ou à convecção natural, mas insignificante em relação à convecção forçada



Ludwig Eduard Boltzmann  
(1844-1906)  
(Físico austríaco)

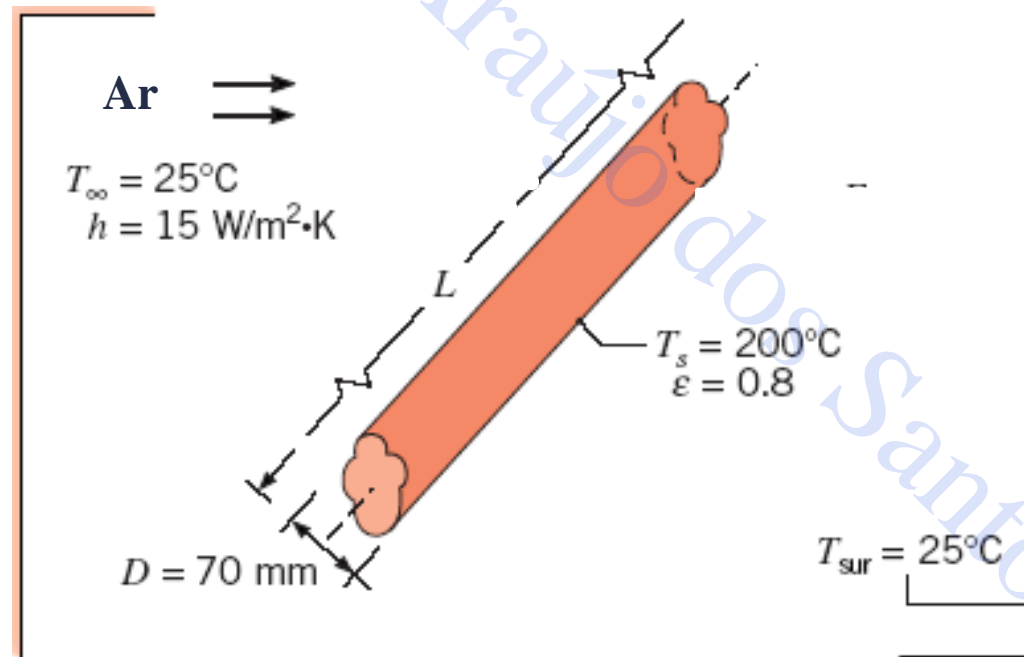


Josef Stefan  
(1835-1893)  
(Físico e matemático austro-esloveno)

# 1. Origem Física e Equações de Taxas

**Exercício Proposto 3:** Uma tubulação de vapor d'água atravessa uma sala na qual o ar e as paredes se encontram a  $25^{\circ}\text{C}$ . O diâmetro externo do tubo é de  $70\text{ mm}$ , a temperatura de sua superfície é de  $200^{\circ}\text{C}$  e esta superfície tem emissividade igual a  $0,8$ . Sendo o coeficiente de transferência de calor por convecção natural ( $h$ ) igual a  $15\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , qual é a taxa de calor perdida pela superfície por unidade de comprimento do tubo? Neste caso, considerar a troca de calor, tanto por convecção natural, quanto por radiação térmica. O que aconteceria se não tivesse sido levado em consideração, além do mecanismo de transferência por convecção, o mecanismo de transferência de calor por radiação térmica?

**OBS.:** o ar não interfere na transferência por radiação térmica, se comportando como transparente





# Bibliografia

**INCROPERA, F.P. e DEWITT, D.P. Fundamentos de transferência de calor e massa, 6ª ed., LTC, 2008.**

**ÇENGEL, Y.A e GHAJAR, A.J.; Transferência de calor e massa, McGraw Hill, 4ª edição, 2012.**

**WELTY, J. R.; RORRER, G. L.; FOSTER, D.G. Fundamentos de Transferência de Momento, de Calor e de Massa; tradução e revisão técnica Verônica Calado, 6. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2017.**